

ITRF97 参考框架下的中国大陆区域地壳 板块运动背景场的建立及应用

姚宜斌¹ 刘经南² 施 闯³ 陶本藻¹

(1 武汉大学测绘学院, 武汉珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学校长办公室, 武汉市珞珈山, 430072)

(3 武汉大学 GPS 工程研究中心, 武汉珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 利用中国地壳运动观测网络工程基准站和基本站的 GPS 实测结果, 构造了一个 ITRF 参考框架下的、充分反映现今板块运动特征的、更为精确的现代中国大陆区域板块运动模型, 介绍了这一工作的思路、方法和最终结果, 并对速度场结果作了初步的解释。

关键词: ITRF 框架; NNR-NUVELIA 模型; 板块运动

中图法分类号: P228.42; P542

大尺度的 GPS 测量, 以其高精度、全天候和机动性强等特点, 成为监测地壳运动进行地球动力学研究的有力手段。自 1992 年以来, 我国先后建立了多个大尺度的高精度 GPS 地壳形变监测网, 对这些存在多期观测的 GPS 观测资料进行统一处理, 可以得到统一框架下的我国地壳运动的测站速度场。由于我国幅员辽阔, 地壳运动的速度场具有比较明显的块体特征, 可以应用块体理论来分析中国大陆各块体的运动特征。

地壳形变和板内构造运动都是在一定板块的背景运动中产生的。为了进行区域性的地壳形变研究, 需要合理地、高精度确定现今区域地壳运动的背景场。由于选择背景场的不同, 同样的形变在不同的背景场下的绝对形变往往不同, 就会产生不同的地学解释, 这将不可避免地影响 GPS 形变监测理论的正确性。因此, 选择一个已有的或重新构造一个更合理的地壳运动背景场就尤为重要。

从国内外的有关文献来看^[1~4], 目前的背景场大都来源于全球的板块运动模型, 往往用欧亚块体的运动特征代替中国大陆块体的运动特征, 而不考虑中国大陆块体运动特征个性差异。

目前, 常常使用的 NNR-NUVELIA 全球板块运动模型是由地质、地球物理建立在地质时间

尺度上的平均模型, 这些模型的精确度和它是否符合现今全球地壳运动的特征尚需用现代空间测量新技术的实测结果检验。也可以独立于任何板块运动的假设, 完全基于空间技术的实测结果, 构造一个充分反映现今板块运动特征、更为精确的现代板块运动模型。用它作为地壳形变和板块构造运动的背景场, 可以很好地消除大区域整体运动趋势的影响, 其结果能更精确地反映各个构造带和区域性地壳形变的现状。

1 数据处理模型

原理上, 如果把块体当作刚性体, 则板块运动欧拉矢量 ω 与测站地心速度 V 之间有:

$$V = \omega \times r \quad (1)$$

式中, r 是测站地心位置矢量。

因板块运动主要反映在水平站速度之中, 况且目前 VIBI、SLR、GPS 三种技术确定垂向站速度还不够精确, 直接采用地心站速度 V 可能会使板块运动参数估计受到垂向站速度误差的影响, 在实用中常把测站地心速度转换为站心速度, 并采用其水平分量(东向速度 v_e 和北向速度 v_n)来求解板块运动欧拉矢量 ω 。

仅约束 v_n 、 v_e , 有:

$$\begin{bmatrix} v_n \\ v_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z \sin B \sin L + Y \cos B & -Z \sin B \cos L - X \cos B & 0 \\ -Z \cos L & -Z \sin L & Y \sin L + X \cos L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

需要注意的是, 由于测站高程变化对 v_n 、 v_e 影响很小, 故在许多文献中对式(2)近似为:

$$\begin{bmatrix} v_n \\ v_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \sin L & -R \cos L & 0 \\ -R \sin B \cos L & -R \sin B \sin L & R \cos B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

如果已知一定数量的点的位置坐标及其速度, 便可以按式(2)求出欧拉矢量 ω_x 、 ω_y 、 ω_z 。其欧拉矢量球面表示为 $(\Omega \lambda \varphi)$, 其中,

$$\Omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2};$$

$$\lambda = \tan^{-1} \frac{\omega_y}{\omega_x};$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega_z}{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}$$

按误差传播率可得 $(\Omega \lambda \varphi)$ 的中误差:

$$\sigma_\Omega = \sqrt{\omega_x^2 \sigma_{\omega_x}^2 + \omega_y^2 \sigma_{\omega_y}^2 + \omega_z^2 \sigma_{\omega_z}^2} / \Omega$$

$$\sigma_\lambda = \sqrt{\omega_x^2 \sigma_{\omega_x}^2 + \omega_y^2 \sigma_{\omega_y}^2} / (\omega_x^2 + \omega_y^2)$$

$$\sigma_\varphi = \sqrt{(\omega_x^2 + \omega_y^2) \sigma_{\omega_z}^2 + \frac{\omega_z^2}{\omega_x^2 + \omega_y^2} (\omega_x^2 \sigma_{\omega_x}^2 + \omega_y^2 \sigma_{\omega_y}^2)} / \Omega^2$$

2 ITRF 参考框架下的中国地壳板块运动背景场的建立

中国地壳运动观测网络工程在中国大陆布设了 1 000 多个 GPS 网点, 其中连续观测的基准站有 25 个(含北京房山、武汉、拉萨、上海、长春等 5 个 IGS 站), 基准站从 1999 年起正式工作, 由于连续观测时间长, 观测精度高, 故可作为计算地壳运动速度场模型的控制速度。另外, 中国地壳运动观测网络工程还有 56 个定期观测的基本站, 在基准站上采用 ASHTECH Z12 接收机和扼流圈天线, 各站观测 4~10 个时段, 每个时段观测 24h。数据处理结果表明, 基准站和基本站的点位坐标精度, 水平分量平均为 2mm 左右, 高程分量平均为 3mm 左右, 位移精度、水平分量平均为 3mm 左右, 高程分量平均为 5mm 左右^[3], 该精度能够满足进行中国大陆现今地壳运动特征分析的需要。由于基准站的观测时间较长, 其速率的精度要比基本站速率精度高, 这在数据分析时要区别对待。

从图 1 可以看出, 中国地壳运动观测网络工程基准站和基本站的点位分布比较均匀, 基本覆

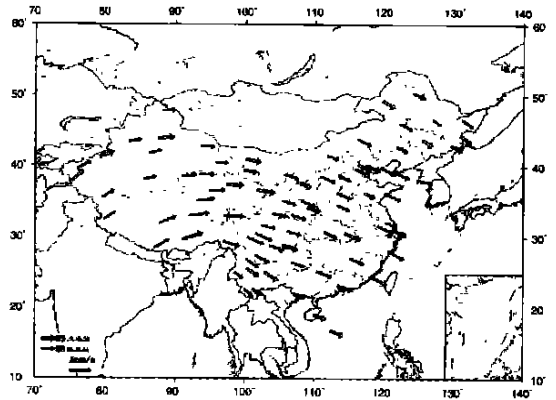


图 1 中国地壳运动观测网络工程基准站和基本站的点位分布和速度场

Fig. 1 The Basic Stations and Fiducial Stations of Crustal Deformation Monitoring Network of China

盖了中国大陆区域, 其平面运动速度在数值量级上保持一致, 在运动趋势上过渡自然, 表现出一定的规律。可以说, 中国地壳运动观测网络工程基准站和基本站能基本反映出 ITRF97 参考框架下中国大陆地壳运动的总体趋势。由于地壳形变监测更关心的是大趋势运动下的局部相对形变, 因此, 有必要也有可能利用现有的高精度 GPS 实测资料, 估算更为合理的中国大陆区域整体运动的欧拉极方向和旋转速率。

由于要建立的是整个块体的速度场, 对于其中的平面和高程方向的离群值和峰值, 笔者认为其不能代表块体的整体运动属性, 因此, 在计算板块的欧拉矢量之前, 对已知点速度的稳定性进行了检验。这里的已知点速度的稳定性是指已知点的运动趋势服从整体运动趋势, 如果已知点的运动趋势不服从整体运动趋势, 则将已知点作为形变点处理, 不参加板块欧拉运动矢量计算。

稳定点的判别通过标准化残差来处理, 在已知均方差因子的情况下, 可构造如下的标准化残差:

$$w_i = \frac{|v_i|}{\sqrt{q_i} \sigma_0} = \frac{|v_i|}{\sigma_{v_i}}$$

式中, w_i 服从标准正态分布, 取显著水平 $\alpha = 0.000 1$, 由正态分布表可查得标准化残差应小于 3.3, 故有

$$\text{零假设 } H_0: w_i = \frac{|v_i|}{\sigma_{v_i}} \leq 3.3 \quad \text{稳定点}$$

$$\text{备选假设 } H_1: w_i = \frac{|v_i|}{\sigma_{v_i}} > 3.3 \quad \text{形变点}$$

经过标准化残差假设检验, 确定最后用于板块欧拉运动矢量计算的稳定点为 77 个(TASH、

LHAS、XIAG、KMIN 四点没有通过标准化残差假设检验), 其计算结果如表 1 所示。

表 1 几种地壳运动模型的比较

Tab. 1 Comparison of Some Crustal Motion Models

模型	$\varphi/ (^{\circ})$	$\lambda/ (^{\circ})$	$\Omega/ 10^{-6} \cdot (^{\circ}) \cdot a^{-1}$	适用区域
NNR-NUVELIA	50.6	-112.4	0.23	欧亚块体
Sillard	48.6±3.2	-120.5±2.82	0.207±0.006	欧亚块体
Larson	56.3±4.3	-102.8±4.1	0.26±0.020	欧亚块体
熊文清、朱文耀等	37.2±1.1	-118.3±3.2	0.206±0.004	欧亚块体
本文计算值	29.9±2.8	-89.2±1.6	0.328±0.019	中国大陆(未进行稳定性检验)
	35.2±2.6	-91.0±1.5	0.314±0.015	中国大陆(进行稳定性检验)

从表 1 可知, 本文的欧拉矢量计算值与 NNR-NUVELIA、Sillard、Larson 等全球板块运动模型所提供的欧亚板块的欧拉极方向和旋转速率在量级和大趋势上是一致的, 但也存在着不可忽略的差异。考虑到这几种板块运动模型的建立所用的数据源和建立方法的不同, 且本文所建立的中国大陆区域的欧拉运动矢量是局部的, 而 NNR-NUVELIA 等所建立的整个欧亚块体的欧拉运动矢量是广域的, 这种差异也能理解。

文献[4]利用 Hardy 多面函数拟合法建立了中国大陆平面地壳运动速度场模型, 并得到了中国大陆区域 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 地壳平面运动整体速度场图像。该图像很好地反映了中国大陆块体的整体运动趋势, 但板块内部的变形特征的差异体现得并不明显, 为此, 又以 NNR-NUVELIA 全球板块运动模型作为背景场, 得到了 NNR-NUVELIA 全球板块运动模型下的平面运动速度场图像。但 NNR-NUVELIA 全球板块运动模型是一种广域的模式, 它反映的是欧亚块体的整体运动趋势, 并不强调中国大陆块体的局部运动特征。对于形变监测而言, 更关注的是大趋势运动下的残余形变, 只有分离了大趋势的背景运动, 才能很好地进行地学解释。为此, 以本文所建立的中国大陆区域板块运动模型作为背景场, 得到了中国大陆区域背景场下的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 地壳平面运动整体速度场图像, 如图 2 所示。

对 NNR-NUVELIA 全球板块运动模型背景场下的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 地壳平面运动整体速度场图像和中国大陆区域背景场下的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 地壳平面运动整体速度场图像进行比较, 可以看出, 后者在数值上要小一些, 对于中国区域 1 270 个 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的格网点, 在 NNR-NUVELIA 全球板块运动模型背景场下, 其平均速率为 0.010 9m/a, 而在中国大陆区域背景场下, 其平均速率为 0.006 3m/a。这说明中国大陆区域背景场对中国大陆地壳运动的整体

趋势反映得更彻底。同时从两种图像所反映的各小区域的局部运动趋势而言, 也存在明显的差别, 就中国西北区域而言, 在 NNR-NUVELIA 全球板块运动模型背景场下, 其运动趋势为北偏东, 而在中国大陆区域背景场下, 其运动趋势为北偏西; 对于黑龙江块体, 在 NNR-NUVELIA 全球板块运动模型背景场下, 其运动趋势为东向运动, 而在中国大陆区域背景场下, 其运动趋势为西向运动, 这与中国东部由于太平洋板块向欧亚板块的俯冲和日本海的弧形扩张, 而受到西向的推挤力是完全相符的。就受力而言, 中国大陆区域背景场下的中国地壳运动速度场图像更符合实际。

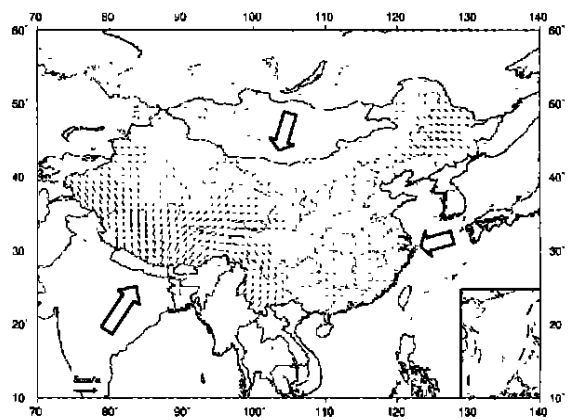


图 2 中国大陆区域背景场下的地壳运动速度场图像

Fig. 2 Planar Speed Field Image of China Under the Background of Chinese Territorial Model($1^{\circ} \times 1^{\circ}$)

从图 2 可知, 中国大陆区域背景场下的中国地壳运动主要发生在西南区域, 其中喜马拉雅、拉萨块体北向运动趋势非常明显, 而羌塘、川滇、滇西块体有明显的顺时针旋转, 在羌塘块体的东部以东向运动为主, 逐渐顺时针过渡, 在川滇块体以东南运动为主, 而滇西块体则以西南运动为主, 其大小约 (10 ~ 25)m/m/a, 是比较明显的活动变形带, 而其他区域的绝对运动不明显, 大都在 10m m

以内。需要注意的是,在鄂尔多斯块体及其邻近区域,存在略微的逆时针转动(这在 NNR-NUVELIA 全球板块运动模型背景场下反映不明显),这主要是由于青藏高原急剧隆升和向周围的扩展,南段产生了强烈的北东向的推举作用,考虑到块体的刚性特性和周围环境块体的约束,这组推举力使鄂尔多斯块体发生逆时针旋转。

从力源上分析,在中国大陆的西南侧,印度板块以大约 50mm/a 的速度向欧亚板块推进,在中国西部产生向北的强烈推举力,形成了一系列近轴向的弧形逆断裂带。在中国东部,由于太平洋板块向欧亚板块的俯冲和日本海的弧形扩张,相当于施加了一个西向的推挤力。在中国大陆的北侧,欧亚板块对中国大陆的北向位移存在阻力。总体而言,印度板块向北挤压依然是影响我国大陆地壳运动的主要因素。

3 结 论

在利用 GPS 实测结果确定区域板块运动模型时,对 GPS 测点的稳定性进行检验也是必要的,由于形变点不能反映整个块体的刚性运动,故形变点不能参加块体运动模型的计算。

在本文所建立的中国大陆区域背景场下,中国区域的运动特征与全球块体运动能很好地符合,得到的中国大陆区域背景场下的运动图像也与现今最新的地学解释极为一致。

同时,通过本文所建立的完全基于空间实测结果的地壳形变和板内构造运动的背景场,可以得到块体在该背景场下的形变量,通过非连续形变分析方法 (DDA) 可以更准确地分析板块内部

的受力机制,这将为中国大陆块体的动态运动场及其动力学机制的进一步研究产生积极的影响。

致谢:本研究所采用的 GPS 观测资料是由武汉大学 GPS 工程研究中心、中国地震局、总参测绘局、国家基础地理信息中心和陕西测绘局所提供的,笔者谨向以上各单位及相关人员表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- 1 孙付平. 空间大地测量数据在地球动力学研究中的应用: [博士后研究报告]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1998
- 2 熊文清, 朱文耀, 张 强. ITRF 参考框架中的全球板块运动. 测绘学报, 2000, 29(2): 102~108
- 3 刘经南, 施 闯, 许才军, 等. 利用局域复测 GPS 网研究中国大陆块体现今地壳运动速度场. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(3): 189~195
- 4 刘经南, 施 闯, 姚宜斌, 等. 多面函数拟合法及其在建立中国地壳平面运动速度场模型中的应用研究. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(6): 500~503
- 5 顾国华, 申旭辉, 王 敏, 等. 中国大陆现今地壳水平运动基本特征. 地震学报, 2001, 23(4): 362~369
- 6 丁国瑜, 卢演涛. 对我国现代板内运动状况的初步探讨. 科学通报, 1986, 18: 1412~1415
- 7 许才军, 刘经南, 晁定波, 等. 利用 GPS 资料研究华北地块旋转运动. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 24(1): 74~78
- 8 Liu J N, Shi C, Xu C J, et al. The Determination of the Speed Field for the Continental Blocks in China. GPS99, Tsukuba, 1999

作者简介: 姚宜斌, 博士生。现主要从事 GPS 数据分析理论和方法研究。

E-mail: ybyao@ultra2.wtustm.edu.cn

Construction and Application of Chinese Crustal Motion Background Field Based on ITRF97 Frame

YAO Yibin¹ LIU Jingnan² SHI Chuang³ TAO Benzhaol¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

(2 Presidential Secretariate, Wuhan University, Luojia Hill Wuhan, China, 430072)

(3 GPS Research Center, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract: In this paper, the observation speed of the basic stations and fiducial stations of the crustal deformation monitoring network of China are used to computer the background field of Chinese Mainland area. The result is different from the background provided by NNR-NUVELIA、Sillard、Larson or some other models. Based on the background field of Chinese Mainland area, the absolute movement of Chinese Mainland plates are primary in the (下转第 376 页)

tect the gross errors, so this paper extends it to detect anomalous deformations. The new method takes the real errors as the study object so it can avoid the defects of taking least square residuals and their function as the study object. The method is that the real errors are calculated directly by adding the condition that the norm of quasi-accurate observations is minimum. The key of it is how to select the quasi-accurate observations (QAOs) correctly. A successful scheme is that the QAOs are chosen through preliminary and fine choices because we do not know which observations have the anomalous deformations in advance. First, the observations are classified into four classes, "0 Sort", "1 Sort", "2 Sort", "3 Sort", according to a certain criterion. The QAOs are selected finely according to the magnitudes of the estimators of real errors. The fine selection ends till the QAOs do not vary. The observations corresponding to the greater magnitudes of the estimators of real errors are the anomalous observations.

Key words: anomalous deformation; quasi-accurate detection; hypothesis test

About the author: CHAI Yanju, postgraduate. Her major study interests are in the error theory and data processing. Her typical achievement is Resolution of the Ill-conditioned and Polluted Equation with Quasi accurate Detection and Ridge Estimate.

E-mail: cyjigg@hotmail.com

(上接第 366 页)

southwest. The Xi-malaya plate and Lasa plate move north, but the Qiangtang area, Chuandian plate and Dianxi plate turn clockwise. In the east of Qiangtang plate, the move trend is east, and then clockwise transition. In Chuandian plate the move trend is southeast. To Dianxi plate the move trend is mainly southwest. The value is approximately 10-25 mm/a, and the deformation is distinct. And in Erdous plate and its nabe, it turn anticlockwise, so we should also pay more attention to these areas.

Key words: ITRF97 frame; NN R-NUVELIA model; plates motion

About the author: Yao Yibin, Ph. D candidate. He is concentrated on the research of the theory and methods of high precision GPS data processing.

E-mail: ybyao@utra2.wtusm.edu.cn